

## PLATAFORMA LINEAL AEROPORTUARIA: ESTUDIO DE LA RELACIÓN DEMORA-INFRAESTRUCTURA MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

Gabriel Ramírez Díaz, Joaquín Piechocki, Alejandro Di Bernardi

Grupo Transporte Aéreo – UIDET GTA-GIAI, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: [ramirezdzgabri@gmail.com](mailto:ramirezdzgabri@gmail.com)

**Palabras claves:** *Aeropuerto, Capacidad Operacional, Indicadores de rendimiento, Infraestructura aeroportuaria, Medioambiente, Plataforma, Simulación.*

### INTRODUCCIÓN

Entre los principales aspectos sobre los cuales se enfoca la gestión del sistema aeroportuario se encuentran la capacidad operacional y el medio ambiente, los cuales históricamente, a pesar de su estrecha relación, han sido analizados a través de herramientas independientes. La bibliografía reciente reporta distintos casos en los que la capacidad del sistema, en particular el subsistema espacio aéreo, es susceptible de ser ampliada a partir de contemplar de manera integrada las dimensiones operacionales y ambientales, como es el caso del aeropuerto de Bologna[1]. Sin embargo, esta clase de estudios aún no se ha hecho extensivo a los subsistemas del área de movimientos del aeropuerto, vale decir al lado aeronáutico.

Dado que los aeropuertos son sistemas complejos en los cuales participan un número de variables significativo, es habitual que los métodos presentes en la literatura se enfoquen sobre un aspecto en particular (operacional, ambiental, económico), y se analicen en forma parcial (por ejemplo, terminal, plataforma, calle de rodaje, pista, espacio aéreo) y desintegrada (estudiando la capacidad operativa o la ambiental). En este contexto, el objetivo general al cual contribuye este estudio es al desarrollo de una herramienta metodológica para la evaluación y análisis del sistema aeroportuario, considerando simultáneamente la dimensión operacional y ambiental.

### DESARROLLO

El presente estudio consistió en tres etapas. La primera etapa incluyó el modelado del problema a través del software SIMMOD [2], el cual se utilizó para caracterizar la dimensión operacional de distintas configuraciones de plataforma (número de puestos). El software SIMMOD permitió cuantificar la demora generada (durante la franja horaria simulada) para cada subsistema, segregada en arribos y partidas. La cuantificación de la demora se realizó en base a las reglas operacionales condicionales incluidas en el modelo, las cuales especifican las acciones a ser tomadas por la simulación en base al estado del sistema.

La segunda etapa consistió en identificar las variables ambientales. La dimensión ambiental puede ser analizada a partir de diferentes variables, por ejemplo, las emisiones de las aeronaves y/o vehículos de handling durante su operación, el impacto de la construcción de la infraestructura, la generación de efluentes durante las actividades aeroportuarias, entre otros. En el presente estudio, se propuso a la superficie en plataforma como indicador del impacto ambiental, dado que el aumento de superficie en plataforma conlleva un aumento en: el impacto de las actividades de construcción, la demanda de materias primas para la

ejecución de obras, el volumen de actividades de mantenimiento, la distancia recorrida por las aeronaves, la dispersión y arrastre de efluentes en plataforma, la cantidad de vehículos de handling requeridos para las operaciones, la distancia recorrida por los vehículos, entre otros. En consecuencia, la superficie de plataforma es un indicador que admite el análisis comparativo de las distintas configuraciones de plataforma cuantificando, a partir de ella, la dimensión ambiental de modo indirecto. En el presente trabajo, aspectos como las emisiones producidas por la operación en la plataforma no fueron contempladas, dado que esto requiere caracterizar un perfil de demanda diario y anual. Dicho nivel de análisis escapó al alcance del presente trabajo. En el presente estudio se empleó el software AirportConstructionEmissionsInventoryTool (ACEIT) [3], el cual permite cuantificar las emisiones de las fuentes Nonroad, Onroad y Fugitivas generadas durante la etapa de construcción. Adicionalmente, se consideraron las emisiones asociadas a la fabricación y obtención del hormigón (principal insumo en la construcción de la plataforma), las cuales fueron estimadas a partir de factores de emisión [4, 5] basados en los lineamientos de los inventario de emisiones [6].

En la tercera etapa se integraron la dimensión operacional y ambiental, limitada a su etapa de construcción. Se las presentó en forma gráfica, y se identificaron sus relaciones. Este análisis permitió llevar a cabo el proceso de evaluación y toma de decisión en el análisis de una plataforma del tipo lineal.

### **Modelado del problema - dimensión operacional**

La información de partida utilizada en el modelo es: configuración esquemática del aeropuerto, tipos de aeronaves (categoría y modelo), programación del día de diseño, reglas operativas asociadas a los procedimientos de despegue-arribo y reglas de operación asignada al uso de la infraestructura.

En el caso del esquema del aeropuerto, dado que el objetivo del estudio fue analizar focalizadamente una plataforma del tipo lineal como un sistema dependiente de los demás componentes de la infraestructura de la parte aeronáutica, fue necesario definir un aeropuerto genérico, junto con las rutas de arribo y partida, para simular el comportamiento de la plataforma lineal incluida. La configuración de campo de vuelo adoptada, corresponde a una pista única con rodaje paralelo. El rodaje paralelo sirve de ingreso y salida a los puestos de estacionamiento. La plataforma cuenta con un único punto de arribo y un único punto de partida. Por otro lado, el espacio aéreo se encuentra conformado por una ruta de arribo, una ruta de partida, y una ruta de escape en caso de aterrizaje abortado. Los puestos de estacionamiento en plataforma se encuentran dispuestos lado a lado, siguiendo los lineamientos de diseño de la FAA [7] y OACI [8] para la configuración de puestos con solapado del área libre de objetos asumiendo como aeronave crítica el B737-800.

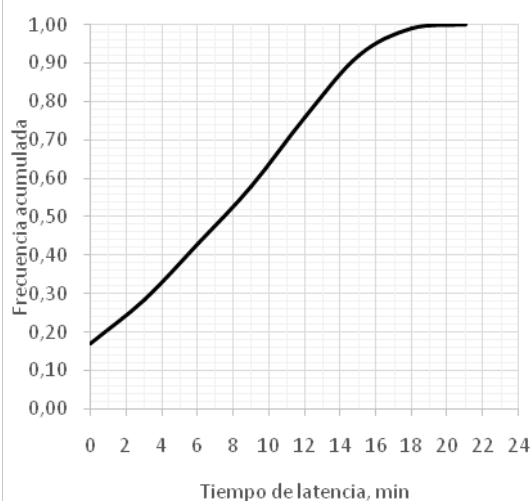
Entre las reglas operacionales incluidas en el modelo, se encuentran las que siguen: a) ninguna aeronave puede despegar o aterrizar si la pista se encuentra activa (otra aeronave está usando la pista), b) el procedimiento de remolque en salida o pushback implica el remolque de la aeronave desde el puesto de estacionamiento hasta la calle de rodaje, donde la aeronave es alineada al eje de la calle de rodaje, c) las operaciones de rodaje, ingreso y salida del puesto de estacionamiento no pueden llevarse a cabo si en el puesto adyacente se está realizando la operación de pushback. En relación a las reglas de separación entre aeronaves se definieron de modo tal que la distancia entre dos aeronaves nunca sea inferior a los 100 m, excepto para las aeronaves en los puestos de estacionamiento, donde la separación entre ellas en plataforma está determinada por las dimensiones del puesto. Las reglas de separación en aire se basan en los mínimos aceptables por los procedimientos de seguridad, asociados a la separación por estela turbulenta. En cuanto a las velocidades de rodaje se fijaron para cada tipo de calle de rodaje: 30 km/h para los rodajes entre la pista y la calle de rodaje en plataforma, 10 km/h para el rodaje en plataforma, y 5 km/h para los rodajes de acceso a puesto y pushback.

Una de las variables que influye en el desempeño de la infraestructura lado aeronáutico son las condiciones a la cual es sometida, en otras palabras, la demanda. Como consecuencia de las operaciones a las que sirve la infraestructura aeronáutica se generan demoras en su uso, e impacto ambiental (de las operaciones) proporcional a dicha demanda. En el presente estudio, la programación de los vuelos de arribo (demanda) se formuló en base a una planificación de tráfico basada en una tasa de arribos constante. La tasa de arribos correspondió a una aeronave cada 3 minutos, que equivale a una magnitud de movimientos de 40 operaciones por hora en una condición de operación estabilizada en donde la ocupación y desocupación de la plataforma opera de manera sostenida. Dicha demanda se mantuvo fija para todas las configuraciones de plataforma analizadas. En el caso del tiempo de servicio que corresponde a las plataformas este fue asignado a cada vuelo siguiendo una distribución de probabilidad cuyo valor esperado fue adoptado en 60 min.

### Definición de distribuciones de probabilidad

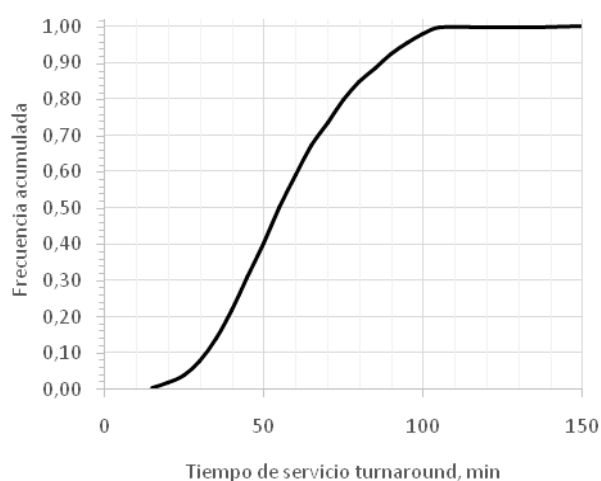
Los procesos de los sistemas de transporte aéreo están compuestos por fenómenos constituidos por cierto grado de aleatoriedad. Estos comportamientos se contemplan en el modelo a través de las distribuciones de probabilidades en tiempos de servicio y aparición de eventos discretos. En particular, las variables afectadas fueron el tiempo de retraso en arribos, servicio en plataforma, puesta en marcha de motores y posicionamiento del pushback.

Siguiendo el orden mencionado, el tiempo de retraso en arribos (retraso respecto al horario programado) es un parámetro asociado a cada vuelo. Éste desvío se puede interpretar como el conjunto de demoras generadas en procesos no modelados generadores de la dispersión y se introdujo en el modelo por medio de la distribución que se presenta en la Figura 1, la cual fue elaborada a partir del procesamiento de los datos publicados por estudios de referencia [9] donde se presenta un modelo analítico para simular la eficiencia de las operaciones turnaround en aeropuertos.



1

Figura



2

Figura

*Figura 1) Distribución estadística del tiempo de latencia en arribos, 2) Distribución estadística del tiempo en plataforma*

El tiempo de servicio tiene asociada la distribución de probabilidad que se muestra en la Figura 2, la cual fue creada a través del procesamiento de los datos publicados por estudios como los de [10] en su estudio sobre el análisis de los AirlineServiceQuality Performance (ASQP).

El procedimiento de pushback tiene asignada dos distribuciones de probabilidad, una asociada al procedimiento del posicionamiento y alineación de la aeronave en la calle de rodaje (Figura 3) y la otra asociada a la puesta en marcha de los motores (Figura 4). Las distribuciones fueron construidas a partir del procesamiento de los datos publicados por [11].

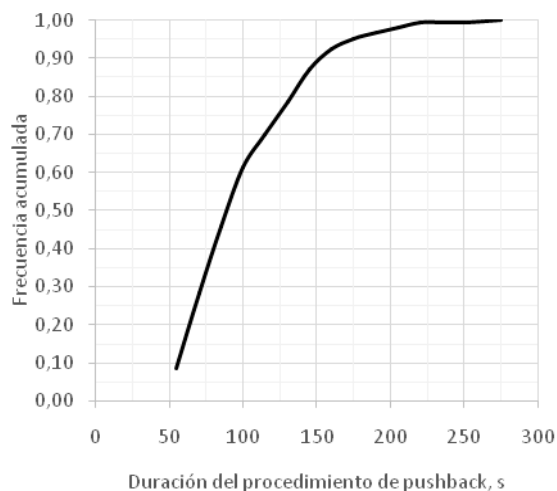


Figura 3

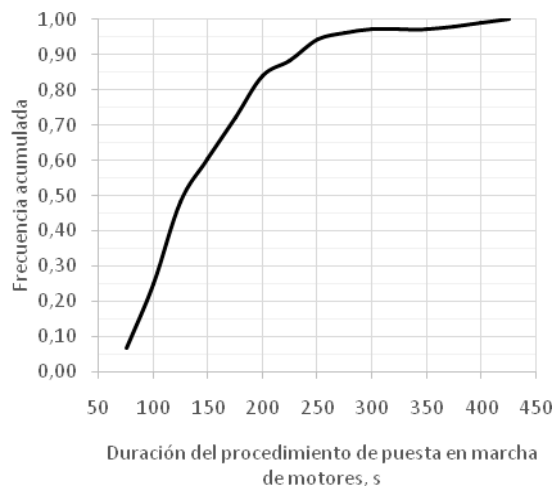


Figura 4

*Figura 3) Distribución estadística de la duración del procedimiento de pushback, 4) Distribución estadística de la duración del procedimiento de puesta en marcha de motores.*

### Calculo de la demora

Una vez definida la configuración básica del sistema, el cual contempla el esquema de aeropuerto (rutas, pistas, rodajes y puestos de estacionamiento), y las condiciones de contorno dadas por los procedimientos de uso de la infraestructura (desarrollada en base a patrones de operación representativos), las reglas de separación, las velocidades operativas, la programación de los vuelos y las distribuciones de probabilidad, se simuló el sistema obteniéndose todas las salidas brindadas por el programa SIMMOD, de las cuales se relevó en forma particular las demoras del subsistema tierra. El cálculo de las configuraciones de plataforma restantes implicó generar puestos adicionales sobre el esquema del aeropuerto, midiendo los cambios marginales producidos en el sistema al agregarlos de a uno. Estos nuevos puestos de estacionamiento contaron con condiciones de contorno idénticas a la de la configuración inicial.

### Modelado del problema - dimensión ambiental

El software ACEIT define tres niveles de análisis para el cálculo de las emisiones del proyecto. Los niveles de análisis son clasificados en función de los datos mínimos requeridos para el ejecutar el programa. En el nivel 1 se requiere la información básica del proyecto: nombre del proyecto, duración de la obra, condiciones climáticas, actividades incluidas en la obra, costo y dimensión de la misma. En cuanto los rendimientos de la mano de obra, equipamiento y materiales, se obtiene a través de factores estándar configurados por defecto en el programa. En este nivel las emisiones se limitan a las fuentes Onroad (vehículos carreteros) y Nonroad (vehículos no carreteros), en el nivel 2 es posible modificar los datos de actividad y rendimientos y en el nivel 3 se definen parámetros adicionales con el objetivo de contabilizar las emisiones fugitivas.

Dado que el presente estudio corresponde a un aeropuerto genérico, se optó por realizar un análisis de Nivel 1, el cual requirió definir dos grupos de entradas: por un lado, las que se conservan fijas independientemente de la configuración de plataforma y, por el otro, aquellas que depende de la configuración de plataforma.

Las entradas independientes de la configuración de plataforma incluyen como supuesto la duración de la obra, temporada de construcción, condiciones climáticas, actividades y equipamiento empleado, las cuales se encuentran definidas a continuación.

Las entradas dependientes del tipo de configuración como *dimensión de plataforma* y *costo del proyecto*, fueron variables definidas para cada tipo de configuración. En el caso de la variable *dimensión de plataforma*, se adoptó una relación lineal dada por:  $y = 1600 n$ , donde  $y$  es la superficie de plataforma a construir y está dada en  $m^2$ , y  $n$  es el número de puestos en plataforma. En el caso de la variable *costo del proyecto*, se cuantifico a través de la expresión  $z = -0.0125 n^2 + 1.875 n + 2.5$ , donde  $z$  es el costo del proyecto expresado en millones de U\$D, y  $n$  es el número de puestos en plataforma.

En relación al cálculo de las emisiones equivalentes del proceso de fabricación de materias primas se consideraron las emisiones asociadas al hormigón, basándose en los lineamientos presentados [6]. Para ello se empleó el factor de emisión publicado [5] correspondiente al hormigón tradicional, el cual equivale a 519 kg CO<sub>2</sub> emitido por m<sup>3</sup> de hormigón. El cálculo del volumen de hormigón se basó en la expresión  $V = e y$ , donde  $y$  es la superficie de plataforma en m<sup>2</sup>, y  $e$  es el espesor del hormigón de la plataforma, el cual fue considerado igual a 0,35 m.

En relación a las emisiones equivalentes globales, la construcción de una plataforma de estacionamiento de aeronaves supone la incorporación de un sistema de infraestructuras mucho más complejo al modelado, en donde sería menester considerar el ciclo de vida de cada elemento conjuntamente con las operaciones que posibilita. El modelo previsto incorpora una evaluación de primer orden asociado a su construcción, que es proporcional al número de puestos, y entonces a los metros cuadrados incorporados. En el caso de considerarse la operación de los vehículos de handling, se prevé que el nivel de emisiones aumente, conservando también un comportamiento lineal. En el caso de considerar la operación de las aeronaves se prevé que, si bien las emisiones totales presentarían un aumento, el comportamiento de la curva será dependiente de la demora en la utilización de la infraestructura, mostrando mínimos para demoras bajo el nivel de servicio límite propuesto (4 minutos). Por otro lado, las emisiones globales de la construcción de la plataforma deberían prorratearse en la vida útil de la infraestructura, que tendrá un límite temporal y un límite en cantidad de operaciones. Esta medida permitirá establecer el aporte contaminante de cada operación en plataforma.

## RESULTADOS

La simulación de los diferentes escenarios permitió medir la demora en cada uno de los subsistemas del aeropuerto para el propósito de este estudio. Los índices de interés fueron las demoras en tierra (dimensión operacional) y las emisiones asociadas al desarrollo de plataforma (dimensión ambiental, limitada en este caso al impacto de la construcción). En la Figura 5 se presenta el aumento de las emisiones de dióxido de carbono equivalentes a la construcción de la superficie de plataforma, mostrando un aumento lineal de este efluente equivalente con la cantidad de puestos. En la Figura 6 se presentan la demora por operación que se registra para tres intensidades diferentes de demanda (a la cual es sometido el sistema de plataforma lineal) a medida que aumenta la disponibilidad de puestos de estacionamiento. La denominada Intensidad I corresponde a una demanda de aeronaves entrantes a la plataforma cada 3 minutos, la Intensidad de demanda II corresponde a 2,5 minutos y la intensidad de demanda III corresponde a 2 minutos de separación. En la generación de la demora concurren la asociación entre calle de rodaje, puestos de estacionamiento y procedimientos aplicados.

La relación observada entre los indicadores de demora y emisiones (Figura 5 y 6), sugiere que, para una determinada demanda, las soluciones de compromiso que contemplan la dimensión ambiental serán aquellas que limiten la ampliación de la plataforma en función de



la elasticidad de la demora. Será conveniente entonces limitar la intensidad de la demanda de la plataforma para alcanzar los niveles de servicio buscados. Estas dos conclusiones indican que 30 puestos de estacionamiento por módulo de plataforma lineal, compuesto por calle de entrada, plataforma, rodaje en plataforma y calle de salida, es un límite práctico para no degradar la eficiencia ambiental de la plataforma. Se puede observar cómo a partir de esta magnitud se manifiestan fenómenos agregados que generan demora que hacen caer abruptamente la elasticidad de la demora con la disponibilidad de puestos de estacionamiento.

Es posible observar que, a partir de determinado nivel de disponibilidad de infraestructura, la incorporación de una mayor capacidad en puestos de estacionamiento no genera una mejora sustancial en la demora, mientras que la generación de impacto ambiental sigue siendo proporcional. De igual modo, es posible observar que existe un patrón de comportamiento de la demora que genera el sistema para distintos niveles de demanda que indica que la mejora en la demora inducida que supone la incorporación de un nuevo puesto de estacionamiento, mejora marginal de la demora, pierde efectividad a partir de un nivel dado de puestos.

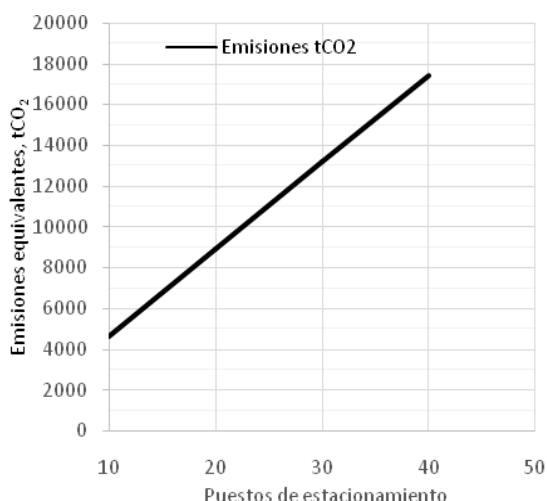


Figura 5

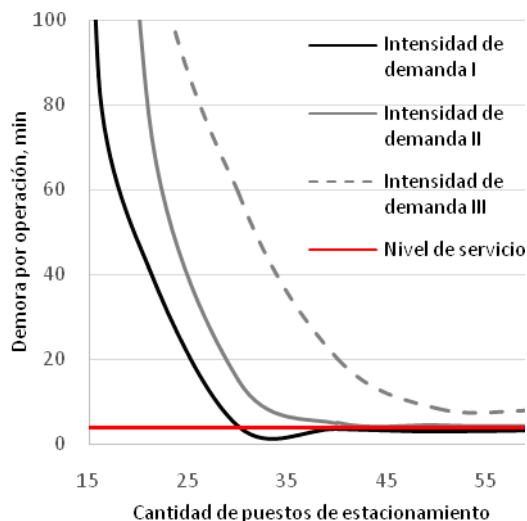


Figura 6

*Figura 5) Relación entre el crecimiento de la plataforma y la emisión global de CO<sub>2</sub>eq6)  
Relación entre cantidad de puesto de la plataforma y la demora promedio por aeronave para distintos niveles de intensidad de demanda, para un nivel de servicio objetivo de 4 minutos de demora*

## CONCLUSIONES

Se puede concluir que, para cada patrón de demanda y configuración de plataforma, existe un límite de ampliación de puestos de estacionamiento. En particular es la dimensión ambiental la que inviabiliza el incorporar capacidad marginal a la plataforma. Vale decir que se evidencia la existencia de límites de ampliación para cada tipología de infraestructura de plataforma dependiente de su equilibrio implícito funcional (relación rodajes y puestos de estacionamiento) y la dimensión ambiental. El funcionamiento del sistema de distribución de demanda, el rodaje de plataforma, introduce límites en la posibilidad de establecer canales de servicio, vale decir puestos de estacionamiento. La Figura 6 indica que es posible establecer un límite del orden de 30 puestos de estacionamientos bajo una misma calle de rodaje, puesto que el impacto ambiental mantiene su proporcionalidad con la superficie incorporada, pero la capacidad de reducir la demora frente a distintas condiciones de demanda pierde efectividad. Es necesario explorar un conjunto de condiciones de demanda

y operación más amplia para determinar regularidades de este comportamiento, como también de comportamiento ambiental de las infraestructuras.

El análisis de los resultados permitió concluir que es posible encontrar un punto de diseño donde la dimensión ambiental y operacional se integren obteniéndose valores equilibrados de desempeño. Este punto de diseño presenta una fuerte dependencia de las características operacionales, dado que es susceptible a la distribución de los tiempos de servicio, retrasos generados en procesos previos al arribo, puesta en marcha de motores y procedimiento de pushback. Es posible establecer una metodología general de integración de variables operacionales y ambientales en torno al concepto de capacidad operativa, para evaluar la infraestructura aeroportuaria en general. El presente estudio representa un caso específico de ese cuerpo metodológico.

## REFERENCIAS

- [1] N. Gualandi, L. Mantecchini, and D. Serrau, "Environmental Capacity and Sustainability of European Regional Airports: A Case Study," *Conf. World Acad. Sci. Technol.*, vol. 2, pp. 783–788, 2008.
- [2] FAA, "Simmod Manual: How SIMMOD Works," pp. 1–79.
- [3] T. R. Board, "ACRP REPORT 102 Guidance for Estimating Airport Construction Emissions," 2013.
- [4] Asociación de Fabricantes de Cemento Portland, "Informe de Sostenibilidad 2011," 2011.
- [5] I. C. Brunatti, "Hormigón y Pavimentos Consideraciones generales," 2013.
- [6] EMEP and EEA, "Air pollutant emission inventory guidebook 2016," 2016.
- [7] Federal Aviation Administration (FAA), "Advisory Circular: AC 150/5300-13A: Airport Design," 2014.
- [8] International Civil Aviation Organization (ICAO), *Anexo 14*. 2009.
- [9] C.-L. Wu and R. E. Caves, "Modelling and optimization of aircraft turnaround time at an airport," *Transp. Plan. Technol.*, vol. 27, pp. 47–66, 2004.
- [10] L. Schaefer and T. Noam, "Aircraft Turnaround Times for Air Traffic Simulation Analyses," *Transp. Res. Board*, 2003.
- [11] W. J. Coupe, D. Milutinovi, W. Malik, and Y. Jung, "A Data Driven Approach for Characterization of Ramp Area Push Back and Ramp-Taxi Processes," *AIAA Aviat. Technol. Integr. Oper. Conf.*, no. June, pp. 1–15, 2016.